表皮効果を正しく理解しよう

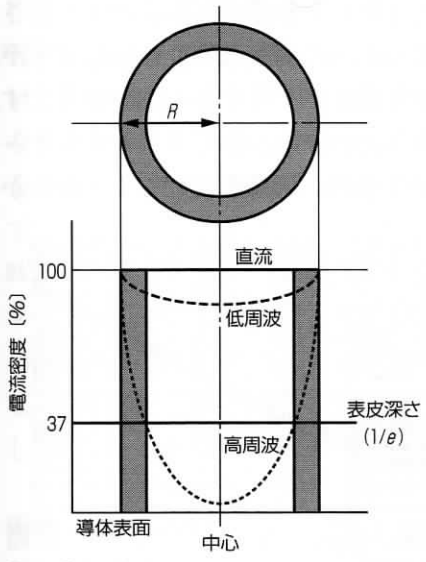
根岸邦夫 NEGISI Kunio

表皮効果とは，ケーブルが伝送する周波数が上がるにつれて信号電流が導体を均一に流れるのではなく，導体の表面に寄って流れるようになる現象です．その結果，電流が流れる導体の断面積が減って，導体抵抗が上昇し，減衰量も増加することになります．表皮効果は太い導体を使用するスピーカーケーブルなどでは可聴周波数帯でこの影響が出てくるので，音質を変える原因にもなります．

上記のような説明が一般的ですが，導体の表面積が大きければ表皮効果の影響をそれだけ少なくできると考える方もおられ，市場に出ている製品の中には，「表皮効果対策で撚り線導体の素線径を細くしてその分の本数を増やし，表面積を増やしました」というような記述を目にします．

PCオーディオやLANなどのデジタル信号を扱う高周波領域では，導体は完全に表皮効果の影響を受けるわけですが，この領域のケーブルではシールド厚はどの程度必要か，などを考える上でも重要な要素です．

図1は表皮効果の説明図です．単線状の円形断面を導体の表面から中心に向かうR方向の電流密度をグラフで示しています．グラフは表面の電流密度を100％とした場合のR方向の電流密度を示します．直流では導体断面のどこをとっても同じ電流密度なので，全体が表面と同じ100％となります．伝わる信号が低周波の場合には中心部分の電流密度が少し低くなります．高周波になると中心部分の電流密度はさらに下がり，遂には中心部分には電流が流れなくなります．



［図1］表皮効果

表皮効果の指標として，表皮深さδが定義されています．表面の電流密度の$1/e$（e：自然対数の底），すなわち，表面の電流密度の37％になる表面からの距離を“表皮深さ”と定義しています．近似的には表皮深さまでの範囲にすべての電流が流れる（導体断面のドーナツ状に濃く塗った部分）と考えることができます．すなわち，表皮効果は表面積を示すのではなく，ドーナツ状の厚さを持つことになります．計算式は以下の通りです．

$$\delta = \sqrt{2\rho / \omega\mu} \quad \cdots\cdots(1)$$

δ：表皮深さ〔m〕　　ω：角周波数$= 2\pi f$

f：周波数〔Hz〕　　μ：透磁率〔F/m〕

ρ：固有抵抗〔Ω・m〕　　$\rho = (\rho_0/\sigma) \times 100$

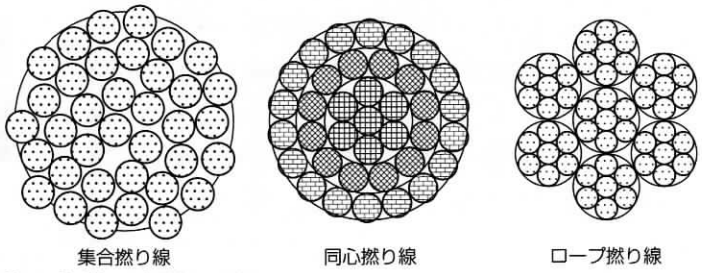
ρ_0：導体の体積固有抵抗〔Ω・m〕　　σ：導体の導電率〔%〕

導体が100％導電率の銅線の場合には次式となります．

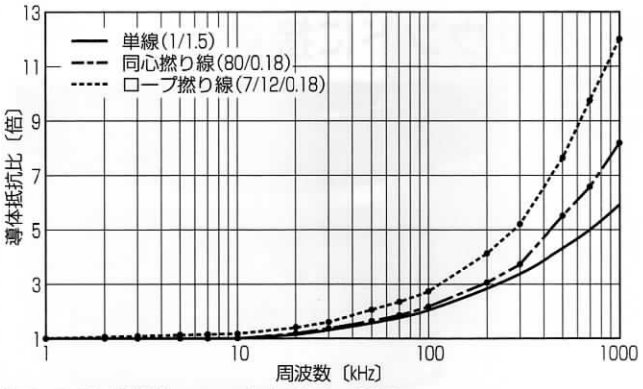
$$\delta_{Cu} = 2.09/\sqrt{f}\ 〔\mathrm{mm}〕 \quad \cdots\cdots(2)$$

f：周波数〔kHz〕

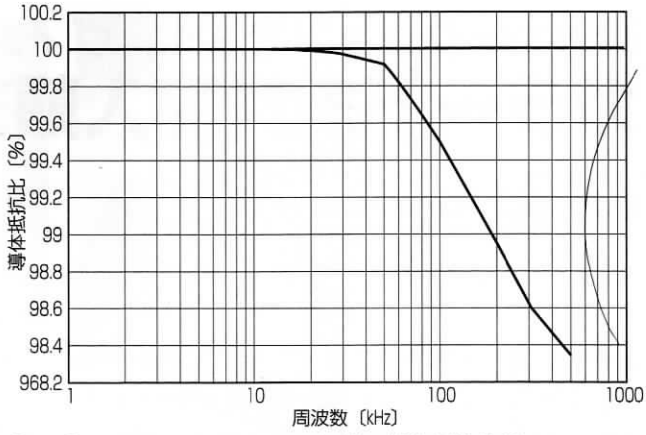
図2に主な撚り線導体について，その断面構造を示します．この断面構造によって表皮効果の影響が違ってくることがあります．汎用の絶縁電線や電源コードの導体と使用されているのが集合撚りです．これは，必要本数の素線を一度に撚る方法なので，撚り線加工費としては最も安価で，柔軟な導体ができます．同心撚りは一般的には各層を逆方向にそれぞれ撚りますが，各層の中心は等しく導体の中心となりますので，“同心”という言葉が使われます．断面はきれいな円形となりますので，信号伝送用に適していますが，各層ごとに撚りますので，撚り線の



［図2］撚り線導体の種類



[図5] 導体構造による表皮効果の影響



[図6] PCOCCとタフピッチ銅線の導体抵抗比較

ります.

課題2：断面構造の違いが及ぼす影響

図2の断面構造の違う導体について，導体抵抗の周波数特性を測定すると，違いがあることがわかっています．図5に単線（1/1.5mm），同心撚り線（80/0.18mm），ロープ撚り線（7/12/0.18mm）について実測した結果を示します．集合撚り線は製造方法によって断面の真円度に差が出ますので，ここでは除外します．

図5では表皮効果による導体抵抗アップを見やすくするために，各周波数の測定値を各導体の直流抵抗で割り，高周波抵抗を倍率として示しています．外観に凹凸があるロープ撚り線では，低い周波数から増加が見られます．表皮深さの計測が導体表面から導体中心に向けたR方向であるため，外観に凹凸のある導体は不利であることがわかります．同心撚り線においては，200kHz付近から単線より抵抗の増加が大きくなります．図3に立ち返り200kHzでの表皮深さをチェックしてみると，おおむね0.18mmとなっています．この厚さは，撚り線の素線径に等しいことがわかります．すなわち，同心撚の最外層の素線径より表皮深さが小さくなる高周波域では，導体抵抗の上昇カーブが増すということにほかなりません．最外層だけの導電率を考えると素線径を下回った表皮厚さに関しては導電率が低下するので，導体抵抗が上昇するのも理解できます．この意味では同心撚り線では素線径を細くして導体を構成することは表皮効果軽減対策になりますが，撚り線の製造加工費が高くなる欠点があります．適当なところで特性と価格の折り合いを付ける必要があるでしょう．

課題：3銅線の表面状態の善し悪しによる表皮効果の違い

導体表面の品質が表皮効果に及ぼす影響の有無についての検証です．図6は通常の軟銅線（タフピッチ銅線：TPC）と単結晶状の導体であるPCOCCで製造したCat.5 LANケーブルについて，その高周波導体抵抗を比較したものです．この導体径は約0.5mmですので，図3から70kHz以上で表皮効果の影響が顕著に出ることがわかります．その直前の50kHz以上で明らかに導体抵抗のアップに差が出ます．LANケーブルとして使用するMHz帯域では2%程度の差となるであろうことがわかります．

PCOCCは単結晶状の導体を線引き加工して製造されるので，結晶粒界がなく，表面がきれいである特徴があります．このように，表皮効果は導体の表面状態では変わることがわかっています．

銅線表面に銅より体積固有抵抗値の小さい銀をメッキした銀メッキ銅線は，裸銅線より表皮効果に関して有利だと考えられる方もいらっしゃるでしょう．銀メッキの厚さが表皮深さの厚さに相当するほど厚ければそのような答えになるでしょう．しかし，一般的にはメッキ層は薄く，またメッキ金属と母材との間には合金層ができ，この合金層の導電率は銅線の導電率よりも低くなります．合金は銀メッキの場合には銀入り銅合金となり，銅の中に銀が10%程度入り込むと導電率は60%程度まで落ちてしまいます．銀メッキは必ずしも表皮効果の低減にはなりません．

表皮効果は導体構成や銅線表面の平滑度によって変わることがありますが，導体素線径を細くして表面積を多くした細線構成では，改善効果がないということがわかります．ケーブル設計上の制約がないなら，単線導体の使用が周波数特性を含めて効果があります．単線導体を採用したLANケーブルは理に適った設計であるといえましょう．